

## Розробка спряжень деталей при використанні полімерних матеріалів з підвищеними триботехнічними характеристиками

А. С. Кобець, В. В. Аулін, А. Д. Деркач, Д. А. Макаренко, А. В. Гриньків, Д. І. Крутоус, Є. С. Муранов

*Проведено порівняльні дослідження полімерних матеріалів, що працюють в спряженнях зі сталлю. В сільськогосподарському машинобудуванні значне місце в конструктивних матеріалах займають полімерні композити. Даний вид матеріалів має низьку вартість, незначні технологічні витрати та володіє доступними переробними характеристиками. Виявлено, що для кожного виду спряжень деталей потрібно формувати набір матеріалів, які максимально відповідатимуть експлуатаційним умовам. Щоб більш детально описати експлуатаційні умови їх потрібно узагальнити конкретними трибологічними та навантажувальними характеристиками. Виходячи з цього, було підібрано навантажувальні режими, які відповідають рухомих спряженням посівних комплексів. Для даних спряжень, під час проведення трибологічних досліджень, необхідно було підібрати матеріал з мінімальними технологічними відхиленнями, але з підвищеними триботехнічними характеристиками.*

*В результаті дослідження було визначено, що для встановлених умов полімерно-композиційний матеріал з високомодульним наповнювачем РА-6,6+30 % F має кращі трибофізичні характеристики у порівнянні з матеріалом РА-6,6. Запропонований матеріал в спряженні зі сталлю 1.1191 має коефіцієнт тертя на 38...41 %, а температура в зоні контакту на 8...12 % менші ніж в спряженні з матеріалом РА-6,6. За проведеним металографічним аналізом поверхонь тертя можна стверджувати, що полімерний композит з високомодульним наповнювачем створює сприятливі умови для їх впровадження у рухомі вузли машин.*

*Отримані результати дають можливість аналізувати та синтезувати композитні матеріали передусім для сільськогосподарського машинобудування, враховуючи саме трибологічні властивості. Особливо цікавими можуть бути результати для сервісних служб та підприємств, що виробляють деталі для посівних комплексів*

*Ключові слова: поліамід, високомодульні наповнювачі, абразивна стійкість, металографія, трибологічна властивість, полімерний композит, скловолокно*

### 1. Вступ

Результати експлуатації різних машин, що працюють в умовах сільськогосподарського виробництва, дають можливість стверджувати, що їх заплановані напрацювання в значній мірі можуть розбігатися від результатів польових випробувань. Важливою особливістю низької надійності машин і механізмів є використання рухомих з'єднаннях деталей трибоспряжень, виготовлених з мета-

левих матеріалів, і які мають низький рівень триботехнічних характеристик. Належний рівень працездатності машин забезпечується технічним обслуговуванням, передусім мащенням через 35...60 годин напрацювання. Невиконання даних рекомендацій спричиняє надмірне накопичення пилу, що є абразивним середовищем для подальшої експлуатації робочих поверхонь трибоспряження деталей та швидкого їх зношування.

Щоб формувати спряження деталей машин, що мають високонадійний технічний стан і будуть працювати підчас довготривалого періоду експлуатації, необхідно підібрати для них трибологічно ефективні матеріали з підвищеним рівнем триботехнічних характеристик.

На основі аналізу технічної документації на матеріали та науково-технічної літератури про їх використання для важконавантажених спряжень деталей визначено ефективність полімерних композитів. Найбільш перспективними, для відповідних умов роботи в сільськогосподарському та транспортному виробництві, є полімерні матеріали з різними наповнювачами, в тому числі скловолокнистими. Їх обґрунтування для конкретних експлуатаційних умов, технологічна розробка та її впровадження є актуальною науково-технічною проблемою. Для раціонального впровадження в спряження деталей машин даних матеріалів, вони потребують дослідження, які спрямовані на виявлення трибологічних властивостей та триботехнічних характеристик полімерних композитів.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Впровадження полімерних композитів дає можливість збільшити ресурс машин, що працюють в жорстких умовах експлуатації. Широкого поширення набули поліамідні матеріали різних модифікацій. Даний вид матеріалу є низьковартісним і доступним у машинобудуванні в необхідній кількості. Допустимих результатів на міцність було отримано при дослідженні композитів поліфталаміду та поліаміду, армованих скловолокном, що відображено в роботі [1]. В той час дослідження були направлені на стаціонарні умови, тому залишилось невирішеним питання динамічних трибологічних умов, що не розглянули автори. Розгляд роботи полімерних деталей в динамічних умовах необхідний, щоб зрозуміти їх ефективність в спряженнях деталей. Використання конструктивних пластиків, що розглядалось в роботі [2], дає змогу формувати силові деталі, але є об'єктивні труднощі при розгляді їхньої ресурсної картини підчас жорстких умов експлуатації в рухомих спряженнях. В роботі [3] наведено особливості пластиків при їх використанні в якості матеріалу валів та шестерень, натомість залишається проблема підбору даного виду матеріалу відносно запиленних режимів експлуатації спряжень деталей. Експлуатаційні умови сільськогосподарського виробництва для класичних металевих матеріалів є жорсткими, що зазначено в роботі [4], а тому для матеріалів рухомих спряжень обов'язково потрібна інформація про їх трибологічну ефективність.

А в роботі [5] розглянуто моделі проектування композитів в області текстильних матеріалів, які формувалися на основі термопружних закономірностей, але додатково потрібно розглянути трибофізичні властивості створених композитів. Застосування волокон дає змогу значно збільшити якість основного полі-

меру, що відображено в роботі [6], але необхідно досліджувати їх вміст для конкретних трибологічних умов і полімерних матеріалів. В даному напрямку детальну увагу приділено в роботі [7], в якій описано метод формування полімерного композиту з вуглецевими волокнами. Використання даного композиту значно збільшує вартість спряжень і інколи вони не є економічно доцільними, а тому необхідно підібрати інші варіанти високомодульних матеріалів в якості наповнювачів, щоб вирішити дану проблему. В роботі [8] зазначаються задачі підбору та створення матеріалів з різними добавками в полімерній основі при реалізації 3D-друку, але при цьому необхідно додатково дослідити їх ефективність з трибологічної точки зору. Також вміст вуглецевих волокон в поліамід дає змогу досягти високих характеристик міцності, як відображено в роботі [9], але збільшить теплопровідний шар, що призведе до максимізації полімерного перенесення матеріалів в спряженнях. В роботі [10] зазначається, що зниження температурних режимів в спряженні деталей виконується за рахунок мастильних матеріалів. В свою чергу, матеріали з полімерних матеріалів сімейства поліаміди володіють значною гідрофільністю, а тому є потреба більш детального дослідження режимів мащення в даних умовах. Донесення речовин мащення до трибологічного контакту можливе при використанні фундаментальних основ пневмоніки, про які описано в роботі [11]. Але дані трибологічні контакти володіють підвищеною вартістю і їх проектування також потребує дослідження експлуатаційних та трибологічних властивостей конкретних спряжень.

В роботі [12] для підвищення трибологічної ефективності спряжень деталей в трибоконттакт добавляють добавки геомодифікатора, але його концентрація, для конкретного виду матеріалів і режимів мащення слід системно досліджувати. Інтенсивний прояв зміни триботехнічних характеристик від якості робочої поверхні підібраних матеріалів в спряженнях деталей значно помітно у важко навантажених агрегатах, про що зазначено в роботі [13]. За даних умов можливе зменшення втрат на тертя за рахунок впровадження нових температуростійких полімерних композитів з відповідним конструктивним обґрунтуванням. У відповідних роботах зазначено, що з розвитком робототехніки з складними рухомими діями [14] та використанням енергоефективних машин [15], необхідно використовувати композиційні матеріали в спряженнях з низькими втратами на тертя. Дані спряження розробляють тільки з погляду конструктивної приналежності, але важливо і необхідно враховувати та досліджувати трибологічну ефективність, економічну доцільність та надійність експлуатації. В роботі [16] відображено, що надійне функціонування автономних машин значно залежить від якості сформованих рухомих з'єднань деталей їх ресурсних картин та складності моделей управління. Досягнення значного рівня надійності потребує правильного оцінювання їх трибологічних характеристик і підбору матеріалів, щоб запобігти критичних зносів деталей спряжень в експлуатації машин. Виявлення невідповідностей та аналіз експлуатаційних властивостей полімерів необхідно постійно удосконалювати, як зазначено в роботі [17], щоб створити умови раціональної розробки різномірних спряжень деталей. При цьому необхідно максимально прив'язуватись до конструктивних особливостей розроблених спряжень деталей систем і агрегатів машин. Композити з підвищеними властивостями розтягу та

міцності були використані в системі АВС-РА-вуглецеві волокна, а їх результати відображені в роботі [18]. Дана система добре себе зарекомендувала при деформуванні на розтяг під час циклічних навантажень, але при жорстких режимах тертя без мащення вона не розглядалась і в подальшому потребує вивчення. Під час дослідження трибологічних процесів необхідно провести раціональний підбір результатів за критерієм бажаності, методичний апарат якої сформовано в роботі [19], але це можливо лише з окресленого комплексу реальних умов процесу тертя. В побутових приладах найчастіше використовуються полімери зміцнені скловолокном, оскільки дані матеріали володіють достатньою міцністю, про що можна спостерігати в роботі [20]. Але використання пластиків для важко навантажених трибоспрямих деталей важливим є підбір пластиків і наповнювачів з необхідними температурними характеристиками. Використання пластиків на даний час дуже поширене при виготовленні вузлів і деталей мехатронних модулів, про що відображено в роботі [21]. Це свідчить, що кожен окремий вузол необхідно розглядати з його функціональних можливостей: трибологічних або міцнісних та для кожного вузла деталей формувати певний вид пластика. Збільшення статичної міцності пластика для стаціонарних спряжень реалізувалося при використанні високомодульних матеріалів в роботі [22], що потребує додаткового досліджування їх динамічних характеристик у рухомих спряженнях. Переробка пластиків також є вигідною стороною такого конструктивного матеріалу, що зазначено в роботі [23], але бажано попередньо оцінювати деструктивні процеси пластику, щоб не знижувати характеристики деталей з вторинних пластиків. В роботі [24] розглянуто зміцнення термопластів за допомогою волокнистих матеріалів, щоб збільшити фізичні характеристики полімеру. При цьому слід зазначити, що кожна характеристика потребує індивідуальних досліджень за концентрацією та вмістом волокон в полімері. У відповідних роботах вивчалось питання покращення характеристик трибоспрямих деталей за рахунок використання мастильного середовища та трибоактивних добавок [25], геомодифікаторів [26], комплексу з літєвим та фторовим милами [27]. Трибологічні властивості спряжень деталей з зазначеними добавками на 10...18 % покращуються лише за умов наявності оливної основи, але в режимах сухого тертя необхідно розглядати можливість в умовах добавки до матриці. В трибоспрямих з армованими пластиками дуже важливо знати механічні властивості, що дає змогу уточнити допустимі навантаження, що вивчалися в роботі [28]. Для рухомих спряжень додатково необхідно вивчати такі властивості, як вони змінюються після процесу тертя. В роботі [29] зазначено, що величина механічних властивостей значно залежить від розміру і розташування наповнювачів, додатково необхідно вивчати як дане розташування впливає на матеріал контр деталі спряження.

В роботі [30] вказано, що поліамід є гідрофільним і це істотно впливає на ресурс деталей, тому необхідно додатково досліджувати як гідрофільність змінюється з вмістом високомодульних наповнювачів в композитах. Збільшення вмісту скловолокна призводить до збільшення текучості та навантаження на розрив зразків полімерних матеріалів, що видно з результатів роботи [31]. За таких умов доцільно дослідити механічні зміни полімерно композиційних матеріалів в спряженнях деталей виготовлених зі сталей матеріалів. Дослідження характе-

ристик на втому при розтягу композитного матеріалу армованого склотканиною розглянуті в роботі [32]. Показано, що даний матеріал для армування добре підходить, але його трибологічні властивості потрібно досліджувати більш детально. Побудова моделі та діаграма життєвого циклу композиційних матеріалів висвітлено в роботі [33], що є корисною для вузлів зі стаціонарними навантаженнями. При проектуванні та створенні рухомих спряжень деталей додатково потрібно розглянути трибологічну картину розроблених матеріалів. Щоб з достатньою точністю аналізувати зміни в спряженнях деталей необхідно врахувати наявну діагностичну інформацію з мінімально можливим часом оновлення бази даних, як представлено в роботі [34]. Причиною цього можуть бути об'єктивні труднощі, пов'язані з аналізом сукупності діагностичних параметрів і їх реалізацією в процесі експлуатації вузлів. В роботі [35] більш детально вивчено ресурсні діаграми деталей вітрових установок з матеріалів, сформованих з склотканини та епоксидної смоли. Розроблений підхід, використаний для деталей які працювали в аеродинамічних режимах навантаження, є ефективний, але вони значно відрізняються від динамічних режимів навантаження деталей підчас тертя, що додатково потребує досліджень. В роботі [36] розглянуто методику формування математичного інструментарію для прогнозування міцності композиційних матеріалів, в основній якій лежить нейронна мережа. За таких умов необхідно використовувати і розширювати можливості для уточнення ресурсної моделі розроблених композиційних матеріалів. В роботі [37] зазначено, що на даний час існує проблема формування композитів з дисперсними наповнювачами, що дають змогу підвищити механічні характеристики матеріалів. В даному випадку існує проблема, що наповнювачі мають складну структуру і низьку сумісність з полімерами, яка ускладнює дослідження їх характеристик і властивостей. Утворення композитів з розчину, як зазначено в роботі [38], показує гарний результат їх фізико-механічних властивостей, що добре себе зарекомендувало при формуванні з цього матеріалу високоточних деталей. Натомість є значний недолік цього методу: отримані деталі мають значно більшу вартість у порівнянні з іншими конструктивними пластиками. Відповідно розглядається використання прогресивних композитних пластиків з біологічними [39] та магнієвими [40] наповнювачами, створюючи надійні спряження деталей для роботи в режимі граничного напруження. Важливою особливістю, яку необхідно дослідити для даних композитів в майбутньому, так це режим сухого тертя в спряженні їх з металевими деталями.

До загальних переваг композитних матеріалів можна віднести їх швидку адаптацію до умов роботи, доступність основних матеріалів та незначна вартість впровадження технологій виготовлення спряжень деталей на їх основі. Тому ефективне використання такого роду матеріалів в спряженнях деталей можливе при детальному вивченні механізмів їх життєвого циклу та відповідності умовам експлуатації.

### **3. Мета та завдання дослідження**

Метою дослідження є експериментальне визначення підвищення рівня трибологічних властивостей і триботехнічних характеристик полімерно-композиційних матеріалів з скловолокнистим наповнювачем.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- дослідити трибологічні властивості та триботехнічні характеристики спряження лабораторних зразків з матеріалів конструктивного композиту з скловолокнистими наповнювачами і сталі в умовах інтенсивного запилення й абразивного зношування;

- отримати характеристики спряжень конструктивного композиту з скловолокнистим наповнювачем та сталі за металографічним аналізом їх робочих поверхонь.

#### **4. Матеріали та методи визначення триботехнічних характеристик спряжень зразків з використанням матеріалу з полімерного композиту**

Дослідження проводили на зразках, виготовлених з полімерних матеріалів, а спряженим матеріалом взято сталь 1.1191 (EN 10083, хімічний склад (%): Ni (<0.4); Mo (<0.1); Cr (<0.4); S (<0.035); P (<0.03); Mn (0.5 - 0.8); Si (<0.4); C (0.42-0.5); Fe (решта)). Полімерні матеріали використовували в якості еталону Поліамід 6,6 (РА-6,6), а для покращення якості спряження запропоновано досліджуваний матеріал Поліамід 6,6+30 % скловолокна (РА-6,6 + 30 % F). Дані матеріали доступні на ринку матеріалів з високомолекулярних сполук у вигляді гранул діаметром 2...3 мм та довжиною 1,5...4 мм.

Виготовлення зразків з полімерних матеріалів виконували на лабораторній машині ПЛ-32, що дає змогу виливати полімерні зразки деталей під тиском (рис. 1). Основні операції даного методу регулюються на пульті керування оператором. До нагрівальної камери машини на початковому етапі виконували завантаження гранул з відповідними розмірами.



Рис. 1. Ливарна машина ПЛ-32

Для формування зразків та деталей з полімерних матеріалів необхідно, щоб вихідним матеріалом було заповнено камеру нагріву, яка в подальшому матиме температуру розплаву матеріалу 488...498 К. Контроль температури виконували відповідно датчики температури, а тиск в камері контролювали за показниками

манометру, який з'єднаний з гідроциліндром. Управління показниками виконував оператор на пульті керування ливарної машини. Розплавлений полімерний матеріал відливали у прес-форми з необхідними розмірами зразків. Зразки мали форму паралелепіпеда з довжиною 53 мм, шириною 29 мм, та висотою 7 мм.

Дослідження зразків на абразивну стійкість та триботехнічні характеристики виконували на спеціально підготовленому комплексі (рис. 2) на базі машини тертя СМЦ-2.



Рис. 2 Комплекс для дослідження процесів тертя в абразивному середовищі та спряжень зразків без мащення: 1 – СМЦ-2 для досліджень в умовах сухого тертя та без мащення; 2 – блок управління та контролю режимами та характеристиками тертя під час дослідження; 3 – СМЦ-2 для досліджень процесу тертя в умовах запиленості

Сутність методу дослідження матеріалів на абразивну стійкість полягала в тому, що за однакових умов виконується зношування досліджуваних зразків матеріалів. Зношування відбувалося з використанням незакріплених абразивних частинок електрокорунду №16Н, які постійно подавались в зону тертя. Перед дослідженням даний абразивний матеріал просушували, щоб рівень вологості був не більше 0,16 %. Загальні характеристики ролика: діаметр 50 мм, ширина 15 мм, твердість по Шору 79...84 А, відносне подовження 16...19 %. Ролик перед дослідженнями припрацьовували за допомогою шліфувального паперу Т2 (зернистість №8П), а потім промивали в бензині і просушували. Досліджування на зношування полімерних зразків проводили на модифікованій машині тертя СМЦ-2 в наступних умовах: навантаження 44 Н; частота обертання 1,0 об./с.

Зважування досліджуваних зразків проводили з допомогою лабораторних ваг ТВЕ-0.21-0.001, II клас точності ДСТУ EN 45501 (рис. 3).

Розрахунок відносної абразивної стійкості виконували шляхом порівняння відносно еталонного матеріалу. В якості еталонного зразка взято Поліамід 6,6. Порівняльний аналіз виконували, враховуючи вагову величину зношування досліджуваних зразків. Відносна величина еталонного зразка при цьому складає 1.





Рис. 3. Загальний вид вагів TBE-0.21-0.001

Визначення коефіцієнту тертя виконували за величиною крутного моменту на електродвигуні машини тертя підчас дослідження. Перед початком досліджень зразки матеріалів притирали один до одного на протязі 3 хв в режимах дослідження, щоб отримувати більш паралельні поверхні тертя і адекватні результати. При цьому визначали коефіцієнт тертя в спряжені зразків і деталей, як відношення величини крутного моменту електродвигуна на прикладене нормальне навантаження. Температуру в зоні контакту визначали за допомогою термопари з електронним блоком "Hyelec MS6501". Термопару встановлювали в отвір зразку полімерного матеріалу. Дані знімалися кожні 5 хв. Отвір розміщували на 1 мм від притертої робочої поверхні зразка. Глибина отвору складала 5...6 мм. В процесі тертя тиск в спряжені зразків складав 0,45...0,5 МПа, а швидкість ковзання -0,781...0,785 м/с.

Дослідження робочих поверхонь тертя виконували на мікроскопі МБИ-6 (рис. 4) зі збільшенням  $\times 400$ .

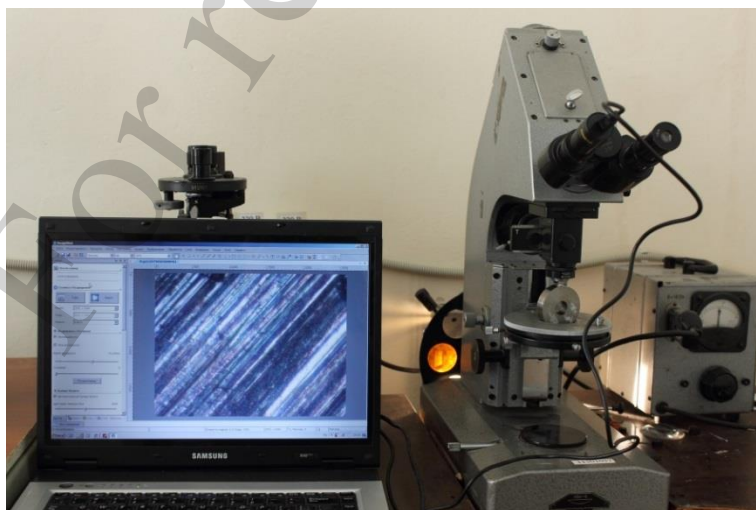


Рис. 4. Загальний вид мікроскопу МБИ-6

Зображення досліджуваних зон тертя фіксували за допомогою окулярної камери спеціально для мікроскопу, а знімки в електронній формі зберігали на ноутбуці для можливого аналізу. Даний комплекс досліджень дасть можливість ствер-



джувати про можливість і раціональність реалізації полімерних композитів для рухомих з'єднань деталей машин, що працюють в умовах абразивного зношування.

## 5. Результати трибологічних досліджень спряження полімерних матеріалів та сталь

### 5.1. Триботехнічні характеристики та властивості спряжень матеріалів

Після проведення досліджень, виявлено значне запилення робочого середовища, що безпосередньо впливає на відносну абразивну стійкість полімерно композиційних матеріалів. Загальний вигляд зразків наведено на рис. 5, на яких відображено також місця встановлення виконавчого елементу термодатчика.

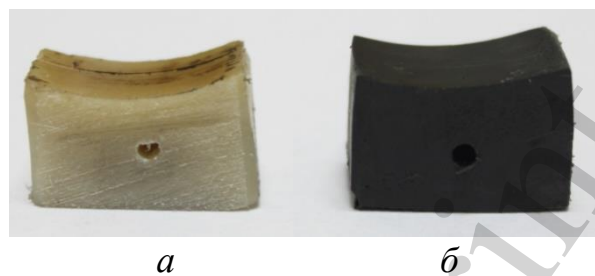


Рис. 5. Зразки після дослідження на абразивну стійкість:  
*a* – PA-6,6; *б* – PA-6,6+30 % F

Кожне дослідження виконували з п'ятиразовим повторенням і визначенням середніх значень відповідних результатів. Порівняльні результати відносної абразивної стійкості представлені на рис. 6.

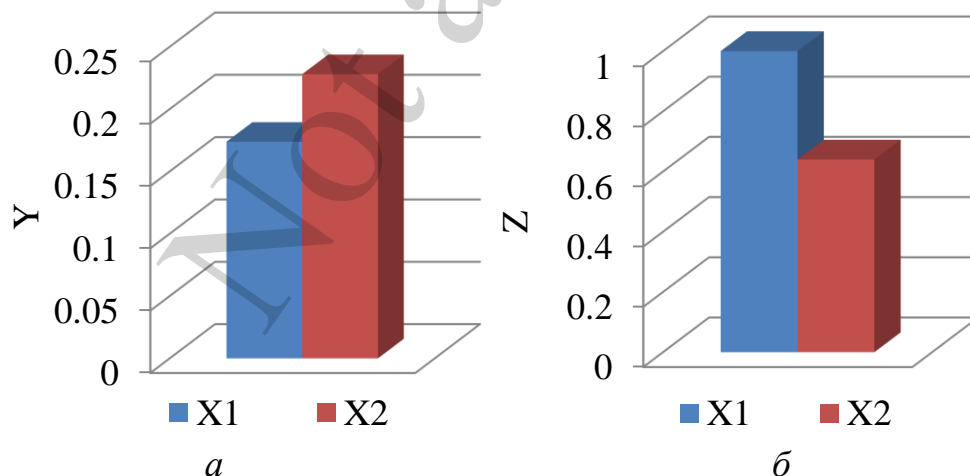


Рис. 6. Середнє значення результатів триботехнічних досліджень зразків в умовах запиленості: *a* – вогневе зношування полімерних зразків, *Y* – ваговий знос, г; *б* – відносна абразивна стійкість полімерних зразків, *Z* – коефіцієнт відносної абразивної стійкості; X1 – PA-6,6; X2 – PA-6,6+30 % F

Можна бачити, що дослідні зразки мають непогані результати під час роботи в абразивному середовищі, але еталонний зразок має кращу зносостійкість.

Результати досліджень на зношування елементів спряжень зразків в умовах відсутності мащення, що формуються з полімерних та сталевих матеріалів, подані на рис. 7.

Триботехнічні характеристики спряжень з полімерних та сталевих матеріалів представлено на рис. 8. Дані характеристики важливі для оцінки енергетичних характеристик сформованих спряжень.

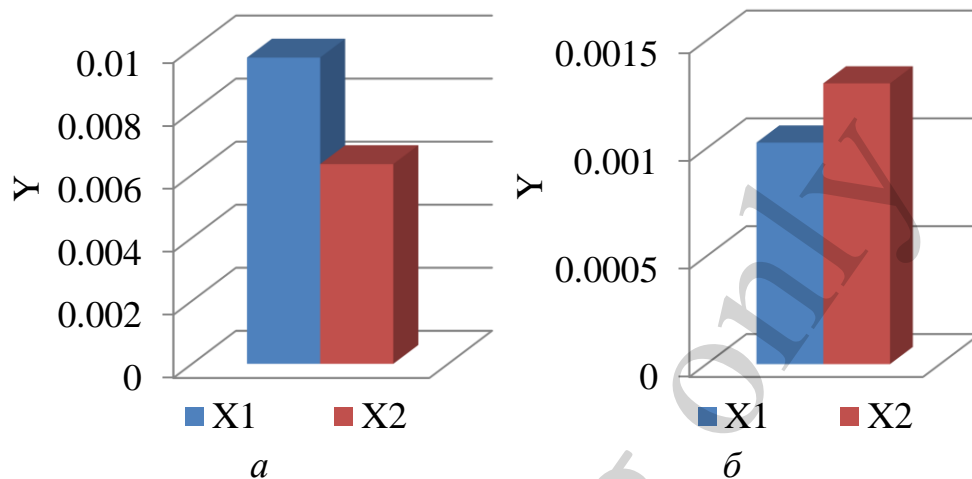


Рис. 7. Середнє значення вагових зношувань:  $Y$  – ваговий знос, г; X1 – РА-6,6; X2 – РА-6,6+30 % F;  $a$  – полімерні зразки;  $b$  – сталеві зразки

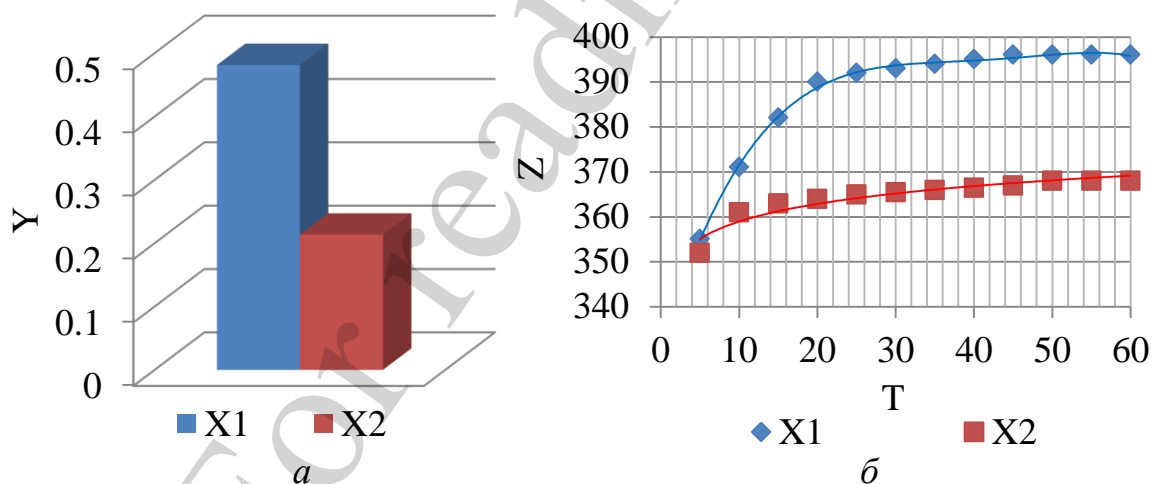


Рис. 8. Трибофізичні характеристики спряжень:  $a$  – коефіцієнт тертя в спряженні полімерних матеріалів зі сталлю,  $Y$  – величина коефіцієнту тертя в спряженні;  $b$  – зміна температури в спряженні полімерних матеріалів зі сталлю;  $Z$  – температура в зоні тертя спряження, К;  $T$  – час проведення дослідження, хв; X1 – РА-6,6; X2 – РА-6,6+30 % F

Триботехнічні характеристики також свідчать про вихід спряжень зразків на експлуатаційний режим досліджуваних спряжень деталей, а тому можна спостерігати нормалізацію та стабілізацію температури в спряженні зразків, а також коефіцієнта тертя (рис. 8,  $b$ ).

## 5. 2. Металографічний аналіз спряжень матеріалів

Важливими даними під час формування спряжень деталей машин є аналіз якості їх робочих поверхонь в процесі тертя. Результати металографічних досліджень еталонного, дослідного та сталевих зразків наведено на рис. 9.

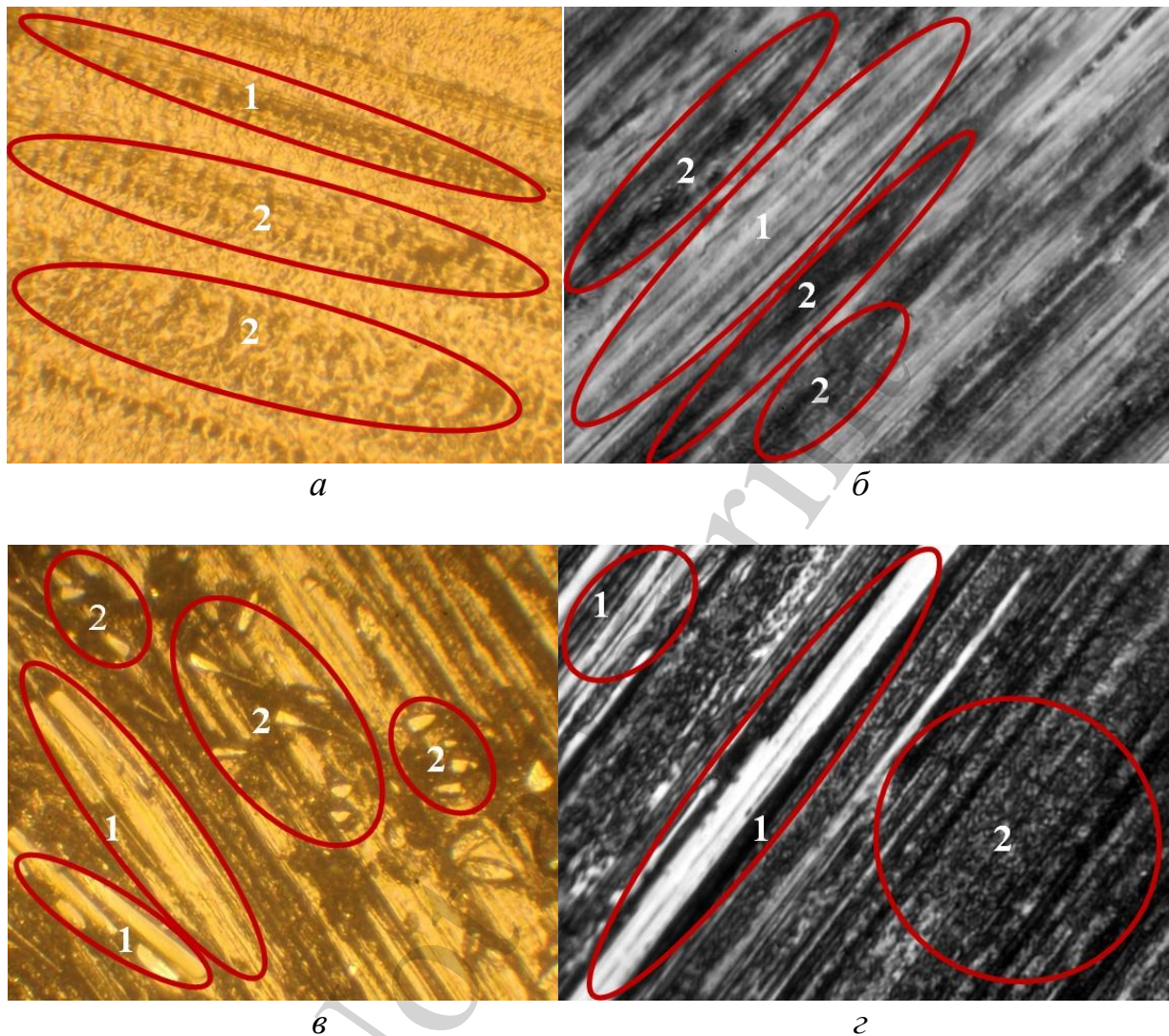


Рис. 9. Металографічні знімки робочих поверхонь зразків полімерних та сталевих матеріалів: *а* – еталонний зразок полімерного матеріалу; *б* – дослідний полімерний матеріал; *в, г* – зразки з сталі,  $\times 400$

Провівши аналіз досліджень можливо формувати рекомендації про реалізацію рухомих з'єднань деталей із запропонованих матеріалів.

## 6. Обговорення результатів дослідження триботехнічних характеристик спряжень зразків полімерних композитів з сталлю

### 6. 1. Обговорення результатів триботехнічних характеристик та властивості спряжень матеріалів

Основною характеристикою, що мають володіти матеріали рухомих з'єднань деталей є конструкційна стійкість до умов експлуатації машин. Особливо це важливо при розробці вузлів сільськогосподарських, транспортних та кар'є-

рних машин. Рухомі спряження працюють в нестационарних умовах і через запиленість часто можуть перегріватися і виходити з ладу через граничне зношування. Для таких рухомих з'єднань деталей і жорстких умов в більшості випадків системи їх мащення не змінюють ресурсної картини. Зайві точки мащення значно збільшують трудомісткість експлуатаційних робіт. Тому доцільним є використання та розробка рухомих з'єднань деталей з допустимим ресурсом без точок мащення. Це є важливою проблемою як матеріалознавства, так і машинобудування.

В даному дослідженні було підібрано низьковартісні матеріали, які можна використовувати для зменшення обсягу сервісних робіт посівних комплексів європейського і вітчизняного виробництва. Всі режими навантажень було обрано виходячи з умов експлуатації з додаванням 10 % збільшення, для забезпечення ресурсного резерву.

Поліамід 6,6 має гарні конструкційні властивості, але він нестійко працює при значних температурних впливах та довготривалих циклічних навантаженнях. В чистому вигляді даний матеріал є гідрофільний, що ускладнює його використання у високоточних спряженнях в умовах суттєвої вологості. В якості запропонованого композиційного матеріалу використано поліамід 6,6 з 30 % вмістом скловолокна. Такий матеріал доступний на ринку і його вартість незначна, а тому машинобудівним та сервісним підприємствам легко модернізуватися під виготовлення і ремонт рухомих з'єднань деталей машин.

Відомо, що триботехнічні характеристики спряжень деталей значно впливають на ресурс вузлів машин. Виходячи з показників зношування в умовах запиленості, рис. 6 можна бачити, що ваговий знос зразків матеріалів РА-6.6 має менші значення в порівнянні з РА-6.6 + 30 % F. Це можна пояснити тим, що в трибологічному контакті є тверді включення скловолокна, які краще утримують мікроабразивні частинки. Показник ваговий знос зразків в умовах запиленості має більшу величину відносно еталонного матеріалу 26...30 %, відносна абразивна стійкість досліджуваного матеріалу знаходиться в межах 62...64 %, що задовольняє експлуатаційним режимам спряжень.

Важливим є і те, щоб підібраний матеріал був ефективний під час роботи в умовах граничного тертя. Ця умова необхідна для матеріалів, які будуть функціонувати в умовах граничного тертя. Враховуючи дані з рис. 7, значення зносу полімерних зразків свідчать, що РА-6.6 + 30 % F має нижчий рівень зносу на 53...54 % за ваговим показником. Разом з тим, сталеві зразки відображають протилежні результати на 21...23 %. Спряження матеріалів "РА-6.6 + 30 % F – сталь 1.1191" має результат відносного зносу на 40...41 % кращий у порівнянні зі спряженням зразків "РА-6.6 – сталь 1.1191".

Триботехнічні характеристики спряжень зразків дають можливість провести оцінку коефіцієнту тертя та експлуатаційні властивості. Матеріал РА-6.6+30 % F в порівнянні з РА-6.6 має коефіцієнт тертя на 38...41 % менше, а температура в зоні тертя менша на 8...12 %, про що свідчать результати з рис. 8. Оскільки показники коефіцієнту тертя і температури мають нижчі значення, тому під час експлуатації деструкція полімерного матеріалу "РА-6.6+30 % F" буде проходити набагато повільніше.

## **6. 2. Обговорення результатів металографічного аналізу спряжень матеріалів**

Протікання процесів тертя в спряженнях можливо наочно спостерігати на металографічних мікрофотографіях робочих поверхнях спряжених зразків рис. 9. На рис. 9, *а* та рис. 9, *б* представлені результати металографічних досліджень спряження матеріалів "РА-6.6 та сталь 1.1191". В даному спряженні полімерний матеріал має явно виражені зони деструкції, зона 1 (рис. 9, *а*). Відповідно з даних зон утворюються частинки зносу і полімерний матеріал локально піддається процесу деструкції й погіршення трибологічних властивостей. Також в зоні 1 відбувається викришування полімеру. На рис. 9, *а* є перехідні зони 2, що характеризують зони максимального переносу полімерного матеріалу на спряжений сталевий зразок, а також зародки деструкції. Відповідно на зразках зі сталі 1.1191 (рис. 9, *б*), також можна спостерігати зони 1, що характеризуються перенесенням полімеру. Зона 2 характеризує трибологічно неактивну робочу зону.

В спряженні матеріалів "РА-6.6 + 30 % F – сталь 1.1191" у відповідності низьких робочих температур деструкція полімеру проявляється в незначній степені, але чітко можна спостерігати зони з тангенціальним 1 та нормальним розміщенням скловолокон. Дані добавки обумовлюють підвищення міцності та збільшення теплопровідності композиту. На рис. 9, *г*, що є спряженням сталевого зразку з матеріалом РА-6.6 + 30 % F виділена зона 1, яка характеризує локальну опорну доріжку тертя. В даному випадку максимальне перенесення полімеру відбувається лише по ній. Протягом збільшення терміну експлуатації кількість доріжок може збільшуватися, але полімер, в основному, буде переноситись на їхню площинку. Зона 2 окреслює область трибологічної зони низької активності. Можливо рекомендувати матеріал "РА-6.6 + 30 % F" для формування спряжень зі сталлю 1.1191 та композиційних матеріалів для виготовлення деталей рухомих з'єднань сільськогосподарських, транспортних та кар'єрних машин. Важливим обмеженням, яке потрібно враховувати при розробці спряжень зразків з запропонованих матеріалів, є температурний режим, що не повинен перевищувати 350–480 К. Це пов'язано з тим, що матеріал в даних межах поступово втрачає свою термостійкість під час експлуатації. Для наступних досліджень в даному напрямку необхідно удосконалювати полімерно-композиційний матеріал, щоб він більш краще працював в абразивно-запиленому середовищі, варіюючи вмістом скловолокна в полімерній матриці.

## **7. Висновки**

1. Отриманий матеріал РА-6.6 + 30 % F в порівнянні з еталонним РА-6.6 має нижчі значення коефіцієнту тертя на 38...41 %, а температура в спряженні зі сталлю 1.1191 знизилась на 8...12 %. В свою чергу спряження матеріалів "РА-6.6 + 30 % F – сталь 1.1191" мають на 40...41 % кращі результати за відносним зношуванням в порівнянні з спряженням " РА-6.6 – сталь 1.1191". Отримані результати свідчать про більшу ефективність використання запропонованого полімерного композиту.

2. Металографічним аналізом виявлено покращення характеристик поверхонь тертя спряження матеріалів "РА-6.6 + 30 % F – сталь 1.1191". Про це свід-



чить зменшена кількість зон деструкції, а також наявність локальних доріжок тертя. З'ясовано, що перенесення полімерного матеріалу також відбувається локально на їх робочі поверхні. В даному спряжені наявні і неактивні трибологічні зони на сталі 1.1191, що є резервом для подальшого утворення опорних доріжок підчас експлуатації спряжень деталей із зазначених матеріалів.

## Література

1. Markowska, O., Markowski, T., Sobczyk, M. (2020). Analysis of the mechanical properties of polymer composites for the production of machine parts used as substitutes for elements obtained from metals. *Polimery*, 65 (04), 311–314. doi: <https://doi.org/10.14314/polimery.2020.4.8>
2. Singh, A. K., Siddhartha, Singh, P. K. (2017). Polymer spur gears behaviors under different loading conditions: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 232 (2), 210–228. doi: <https://doi.org/10.1177/1350650117711595>
3. Quan, Z., Suhr, J., Yu, J., Qin, X., Cotton, C., Mirotznik, M., Chou, T.-W. (2018). Printing direction dependence of mechanical behavior of additively manufactured 3D preforms and composites. *Composite Structures*, 184, 917–923. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.055>
4. Aulin, V., Lyashuk, O., Tykhyi, A., Karpushyn, S., Denysiuk, N. (2018). Influence of Rheological Properties of a Soil Layer Adjacent to the Working Body Cutting Element on the Mechanism of Soil Cultivation. *Acta Technologica Agriculturae*, 21 (4), 153–159. doi: <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0028>
5. Kamiya, R., Cheeseman, B. A., Popper, P., Chou, T.-W. (2000). Some recent advances in the fabrication and design of three-dimensional textile preforms: a review. *Composites Science and Technology*, 60 (1), 33–47. doi: [https://doi.org/10.1016/s0266-3538\(99\)00093-7](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(99)00093-7)
6. Huang, Z.-M., Zhang, Y.-Z., Kotaki, M., Ramakrishna, S. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 63 (15), 2223–2253. doi: [https://doi.org/10.1016/s0266-3538\(03\)00178-7](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(03)00178-7)
7. Tekinalp, H. L., Kunc, V., Velez-Garcia, G. M., Duty, C. E., Love, L. J., Naskar, A. K. et. al. (2014). Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 105, 144–150. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.10.009>
8. Chong, S., Yang, T. C.-K., Lee, K.-C., Chen, Y.-F., Juan, J. C., Tjong, T. J. et. al. (2020). Evaluation of the physico-mechanical properties of activated-carbon enhanced recycled polyethylene/polypropylene 3D printing filament. *Sādhanā*, 45 (1). doi: <https://doi.org/10.1007/s12046-020-1294-7>
9. Karsli, N. G., Aytac, A. (2013). Tensile and thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composites. *Composites Part B: Engineering*, 51, 270–275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.03.023>
10. Aulin, V., Hryniv, A., Lysenko, S., Rohovskii, I., Chernovol, M., Lyashuk, O., Zamota, T. (2019). Studying truck transmission oils using the method of thermal-oxidative stability during vehicle operation. *Eastern-European Journal of*



Enterprise Technologies, 1 (6 (97)), 6–12. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156150>

11. Aulin, V. V., Chernovol, M. I., Pankov, A. O., Zamota, T. M., Panayotov, K. K. (2017). Sowing machines and systems based on the elements of fluidics. INMATEH - Agricultural Engineering, 53 (3), 21–28. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85039172369&partnerID=40&md5=2468069fc8914b34091c229527a0cc3e>

12. Aulin, V., Lysenko, S., Lyashuk, O., Hrinkiv, A., Velykodnyi, D., Vovk, Y. et. al. (2019). Wear Resistance Increase of Samples Tribomating in Oil Composite with Geo Modifier KGMF-1. Tribology in Industry, 41 (2), 156–165. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.02.02>

13. Aulin, V., Hryniv, A., Lysenko, S., Dykha, A., Zamota, T., Dzyura, V. (2019). Exploring a possibility to control the stressed-strained state of cylinder liners in diesel engines by the tribotechnology of alignment. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (12 (99)), 6–16. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.171619>

14. Savkiv, V., Mykhailyshyn, R., Fendo, O., Mykhailyshyn, M. (2017). Orientation Modeling of Bernoulli Gripper Device with Off-Centered Masses of the Manipulating Object. Procedia Engineering, 187, 264–271. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.374>

15. Savkiv, V., Mykhailyshyn, R., Duchon, F., Fendo, O. (2017). Justification of design and parameters of Bernoulli–vacuum gripping device. International Journal of Advanced Robotic Systems, 14 (6), 172988141774174. doi: <https://doi.org/10.1177/1729881417741740>

16. Trizuljak, A., Duchon, F., Rodina, J., Babinec, A., Dekan, M., Mykhailyshyn, R. (2019). Control of a small quadrotor for swarm operation. Journal of Electrical Engineering, 70 (1), 3–15. doi: <https://doi.org/10.2478/jee-2019-0001>

17. Aulin, V., Derkach, O., Makarenko, D., Hryniv, A., Pankov, A., Tykhyi, A. (2019). Analysis of tribological efficiency of movable junctions “polymeric-composite materials – steel.” Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (12 (100)), 6–15. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176845>

18. Kass, M. D., Janke, C., Theiss, T., Baustian, J., Wolf, L., Koch, W. (2015). Compatibility Assessment of Plastic Infrastructure Materials with Test Fuels Representing E10 and iBu16. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 8 (1), 95–110. doi: <https://doi.org/10.4271/2015-01-0894>

19. Aulin, V., Hryniv, A., Lyashuk, O., Vovk, Y., Lysenko, S., Holub, D. et. al. (2020). Increasing the Functioning Efficiency of the Working Warehouse of the “UVK Ukraine” Company Transport and Logistics Center. Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, 22 (2), 3–14. doi: <https://doi.org/10.26552/com.c.2020.2.3-14>

20. Pinto, C., Andrade e Silva, L. G. (2007). Study of ionizing radiation on the properties of polyamide 6 with fiberglass reinforcement. Radiation Physics and Chemistry, 76 (11-12), 1708–1710. doi: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2007.05.004>

21. Aulin, V. V., Pankov, A. O., Zamota, T. M., Lyashuk, O. L., Hryniv, A. V., Tykhyi, A. A., Kuzyk, A. V. (2019). Development of Mechatronic Module for the Seeding Control System. *INMATEH Agricultural Engineering*, 59 (3), 181–188. doi: <https://doi.org/10.35633/inmateh-59-20>
22. Braun, D., Disselhoff, R., Guckel, C., Illing, G. (2001). Rohstoffliches Recycling von glasfaserverstärktem Polyamid-6. *Chemie Ingenieur Technik*, 73 (3), 183–190. doi: [https://doi.org/10.1002/1522-2640\(200103\)73:3<183::aid-cite183>3.0.co;2-j](https://doi.org/10.1002/1522-2640(200103)73:3<183::aid-cite183>3.0.co;2-j)
23. Bernasconi, A., Davoli, P., Rossin, D., Armanni, C. (2007). Effect of reprocessing on the fatigue strength of a fibreglass reinforced polyamide. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38 (3), 710–718. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.09.012>
24. Fu, S.-Y., Mai, Y.-W., Ching, E. C.-Y., Li, R. K. Y. (2002). Correction of the measurement of fiber length of short fiber reinforced thermoplastics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33 (11), 1549–1555. doi: [https://doi.org/10.1016/s1359-835x\(02\)00114-8](https://doi.org/10.1016/s1359-835x(02)00114-8)
25. Aulin, V., Hryniv, A., Lysenko, S., Zamota, T., Pankov, A., Tykhyi, A. (2019). Determining the rational composition of tribologically active additive to oil to improve characteristics of tribosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (12 (102)), 52–64. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184496>
26. Aulin, V., Lyashuk, O., Hryniv, A., Lysenko, S., Zamota, T., Vovk, Y. et. al. (2019). Determination of the Rational Composition of the Additive to Oil with the Use of the Katerynivka Friction Geo Modifier. *Tribology in Industry*, 41 (4), 548–562. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.04.08>
27. Aulin, V., Hryniv, A., Lysenko, S., Lyashuk, O., Zamota, T., Holub, D. (2019). Studying the tribological properties of mated materials C61900 - A48-25BC1.25BNo. 25 in composite oils containing geomodifiers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (12 (101)), 38–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179900>
28. Thomason, J. L. (2001). Micromechanical parameters from macromechanical measurements on glass reinforced polyamide 6,6. *Composites Science and Technology*, 61 (14), 2007–2016. doi: [https://doi.org/10.1016/s0266-3538\(01\)00062-8](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(01)00062-8)
29. Gnatowski, A., Kijo-Kleczkowska, A., Gołębski, R., Mirek, K. (2019). Analysis of polymeric materials properties changes after addition of reinforcing fibers. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 30 (6), 2833–2843. doi: <https://doi.org/10.1108/hff-02-2019-0107>
30. Ren, L., Chen, J., Lu, Q., Han, J., Wu, H. (2021). Anti-biofouling nanofiltration membrane constructed by in-situ photo-grafting bactericidal and hydrophilic polymers. *Journal of Membrane Science*, 617, 118658. doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118658>
31. Gnatowski, A., Koszkuł, J. (2005). Investigations of the influence of compatibilizer and filler type on the properties of chosen polymer blends. *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163, 52–58. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.240>

32. Esmaeillou, B., Fitoussi, J., Lucas, A., Tcharkhtchi, A. (2011). Multi-scale experimental analysis of the tension-tension fatigue behavior of a short glass fiber reinforced polyamide composite. *Procedia Engineering*, 10, 2117–2122. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.350>
33. Vassilopoulos, A. P., Manshadi, B. D., Keller, T. (2010). Piecewise non-linear constant life diagram formulation for FRP composite materials. *International Journal of Fatigue*, 32 (10), 1731–1738. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.03.013>
34. Hryniv, A., Rogovskii, I., Aulin, V., Lysenko, S., Titova, L., Zagurskiy, O., Kolosok, I. (2020). Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters for a cylinder-piston group in the diesel engine during operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (5 (105)), 19–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206073>
35. Vassilopoulos, A. P., Manshadi, B. D., Keller, T. (2010). Piecewise non-linear constant life diagram formulation for FRP composite materials. *International Journal of Fatigue*, 32 (10), 1731–1738. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.03.013>
36. Vassilopoulos, A., Georgopoulos, E., Dionysopoulos, V. (2007). Artificial neural networks in spectrum fatigue life prediction of composite materials. *International Journal of Fatigue*, 29 (1), 20–29. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.03.004>
37. Faridirad, F., Ahmadi, S., Barmar, M. (2016). Polyamide/Carbon Nanoparticles Nanocomposites: A Review. *Polymer Engineering & Science*, 57 (5), 475–494. doi: <https://doi.org/10.1002/pen.24444>
38. Okumura, T., Sonobe, K., Ohashi, A., Watanabe, H., Watanabe, K., Oyamada, H. et. al. (2020). Synthesis of polyamide-hydroxyapatite nanocomposites. *Polymer Engineering & Science*, 60 (7), 1699–1711. doi: <https://doi.org/10.1002/pen.25414>
39. Marset, D., Dolza, C., Boronat, T., Montanes, N., Balart, R., Sanchez-Nacher, L., Quiles-Carrillo, L. (2020). Injection-Molded Parts of Partially Biobased Polyamide 610 and Biobased Halloysite Nanotubes. *Polymers*, 12 (7), 1503. doi: <https://doi.org/10.3390/polym12071503>
40. Kamerling, S., Schlarb, A. K. (2020). Magnesium hydroxide – A new lever for increasing the performance and reliability of PA66/steel tribosystems. *Tribology International*, 147, 106271. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106271>